ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2020, том 83, № 5, с. 444–450

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА $e^+e^- \to K^+K^-$ С ДЕТЕКТОРОМ КМД-3

© 2020 г. В. Л. Иванов[1),2)*]
(от имени коллаборации КМД-3)

Поступила в редакцию 05.05.2020 г.; после доработки 05.05.2020 г.; принята к публикации 05.05.2020 г.

Представлены предварительные результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \to K^+K^-$ в диапазоне энергий в системе центра масс от 1.075 до 1.975 ГэВ. Анализ проводится на основе 62.9 пбн$^{-1}$ интегральной светимости, набранных детектором КМД-3 в экспериментальных заходах 2019 г. Подавление фоновых событий процессов $e^+e^- \to e^+e^-(\gamma)$, $\mu^+\mu^-(\gamma)$, $\pi^+\pi^-(\gamma)$ и событий с космическими мюонами осуществляется с использованием информации об удельном энерговыделении заряженных частиц в слоях жидкоксенонового калориметра КМД-3. Предварительные результаты измерения сечения $e^+e^- \to K^+K^-$ находятся в разумном согласии с предыдущими измерениями и имеют сравнимую статистическую точность.

DOI: 10.31857/S0044002720050141

ВВЕДЕНИЕ

Измерение адронных сечений e^+e^--аннигиляции в адроны необходимо для вычисления адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона $(g-2)_\mu$. Наблюдаемое отличие на уровне $\sim 3.5\sigma$ между расчетным [1–4] и экспериментально измеренным [5] значениями $(g-2)_\mu$ требует более точного измерения названных сечений.

В настоящей работе мы представляем предварительные результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \to K^+K^-$ в диапазоне энергий в системе центра масс ($E_{\text{c.m.}}$) от 1.075 до 1.975 ГэВ с детектором КМД-3 [6] на коллайдере ВЭПП-2000 [7] (ИЯФ СО РАН, Новосибирск). Анализ основан на интегральной светимости 62.9 пбн$^{-1}$, набранной КМД-3 в экспериментальных заходах 2019 г. Данный процесс ранее изучался коллаборациями BaBar [8] и СНД [9]. Особенностью нашего анализа является использование новой методики идентификации каонов [10], использующей информацию об удельном энерговыделении заряженных частиц в слоях жидкоксенонового калориметра детектора КМД-3.

ДЕТЕКТОР КМД-3

Детальное описание детектора КМД-3 и его физической программы приведено в работе [6]. Трековая система КМД-3 представлена дрейфовой камерой (ДК) с 1218 аксиальными гексагональными ячейками и двуслойной многопроволочной пропорциональной Z-камерой. Магнитное поле 1.3 Тл создается тонким ($\sim 0.1X_0$) сверхпроводящим соленоидом, расположенным между трековыми системами и баррельным калориметром. Торцевой калориметр состоит из 680 кристаллов BGO толщиной

[1)] Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.
[2)] Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ), Новосибирск, Россия.
[3)] Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), Россия.
[4)] Университет Виктории, Канада.
[5)] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва.
Коллаборация КМД-3: Р. Р. Ахметшин[1),2)], А. Н. Амирханов[1),2)], А. В. Анисенков[1),2)], В. М. Аульченко[1),2)], В. Ш. Банзаров[1)], Н. С. Баштовой[1)], Д. Е. Беркаев[1),2)], А. Е. Бондарь[1),2)], А. В. Брагин[1)], А. И. Воробьев[1)], С. Е. Гаязов[1),2)], А. А. Гребенюк[1),2)], С. С. Грибанов[1),2)], Д. Н. Григорьев[1),2),3)], Д. А. Епифанов[1)], А. Л. Ерофеев[1),2)], Ф. В. Игнатов[1)], С. В. Карпов[1)], В. Ф. Казанин[1),2)], А. Н. Козырев[1)], Е. А. Козырев[1),2)], И. А. Кооп[1),2)], А. А. Коробов[1),2)], П. П. Кроковный[1),2)], А. С. Кузьмин[1)], И. Б. Логашенко[1),2)], П. А. Лукин[1),2)], К. Ю. Михайлов[1),2)], В. С. Охапкин[1)], Ю. Н. Пестов[1)], А. С. Попов[1),2)], Г. П. Разуваев[2)], А. А. Рубан[1)], А. Е. Рыжененков[1),2)], Н. М. Рыскулов[1)], А. В. Семенов[1),2)], А. Л. Сибиданов[4)], Е. П. Солодов[1),2)], А. А. Талышев[1),2)], В. М. Титов[1)], С. С. Толмачев[1),2)], А. А. Усков[1),2)], Г. В. Федотович[1),2)], В. Е. Шебалин[1),2)], Б. А. Шварц[1),2)], Д. Б. Шварц[1),2)], Ю. М. Шатунов[1)], С. И. Эйдельман[2),1),5)], Л. Б. Эпштейн[1),3)], Ю. В. Юдин[1)].
*E-mail: vyacheslav_lvovich_ivanov@mail.ru

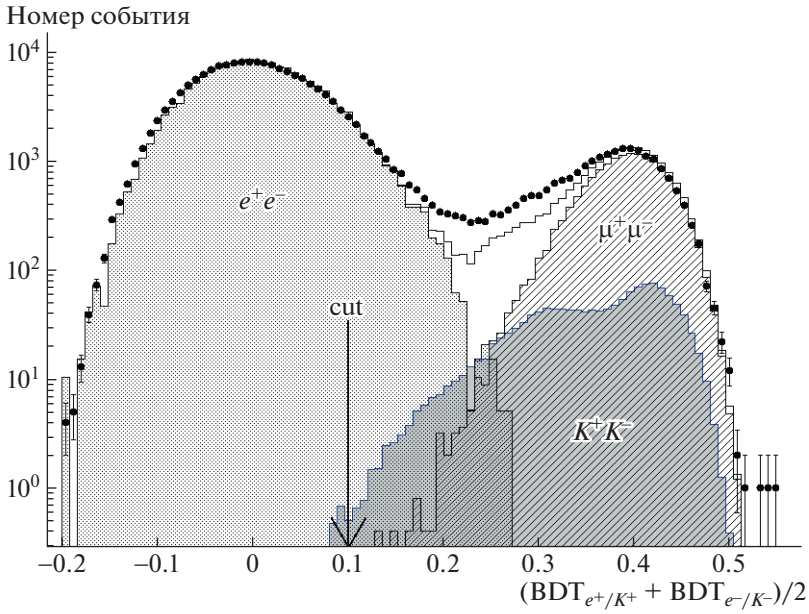

Рис. 1. Распределение среднего по двум трекам отклика $\mathrm{BDT}(e^\pm, K^\pm)$ для событий в точке $E_{\mathrm{beam}} = 936$ МэВ. Маркеры с ошибками — эксперимент, открытая гистограмма — полное моделирование сигнального и фоновых процессов. Также показаны смоделированные вклады процессов $e^+e^- \to e^+e^-(\gamma), \mu^+\mu^-(\gamma), K^+K^-(\gamma)$.

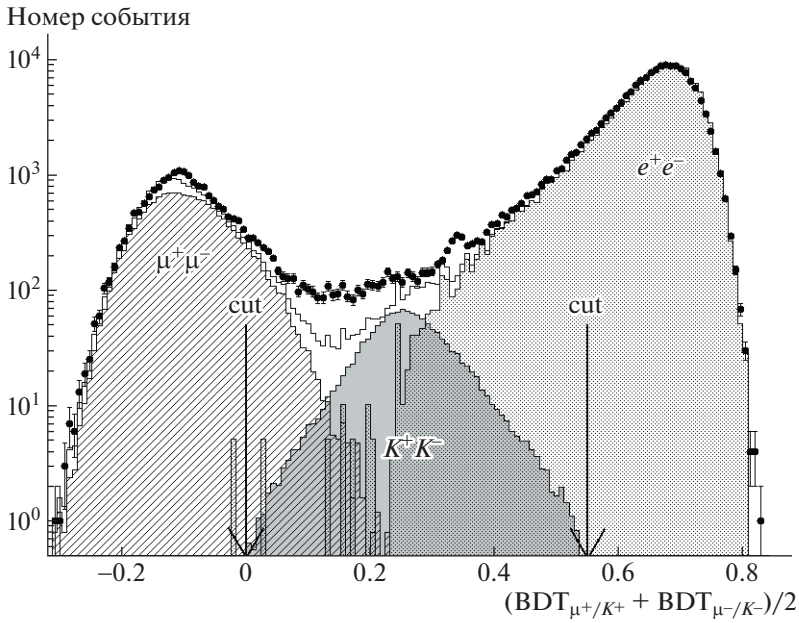

Рис. 2. Распределение среднего по двум трекам отклика $\mathrm{BDT}(\mu^\pm, K^\pm)$ для событий в точке $E_{\mathrm{beam}} = 936$ МэВ. Маркеры с ошибками — эксперимент, открытая гистограмма — полное моделирование сигнального и фоновых процессов. Также показаны смоделированные вклады процессов $e^+e^- \to e^+e^-(\gamma), \mu^+\mu^-(\gamma), K^+K^-(\gamma)$.

$13.4X_0$. Баррельный калориметр состоит из двух подсистем — внутреннего многослойного ионизационного калориметра на основе жидкого ксенона (LXe) и внешнего сцинтилляционного на основе кристаллов CsI(Tl). Количество вещества перед баррельным калориметром составляет $\sim 0.35X_0$.

В течение экспериментальных заходов энергия пучков измерялась методом обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов с точностью $\sim$50 кэВ [11]. Интегральная светимость определялась на основе событий процессов $e^+e^- \to e^+e^-$ и $e^+e^- \to \gamma\gamma$ с систематической неопределенностью $\sim$1% [12].

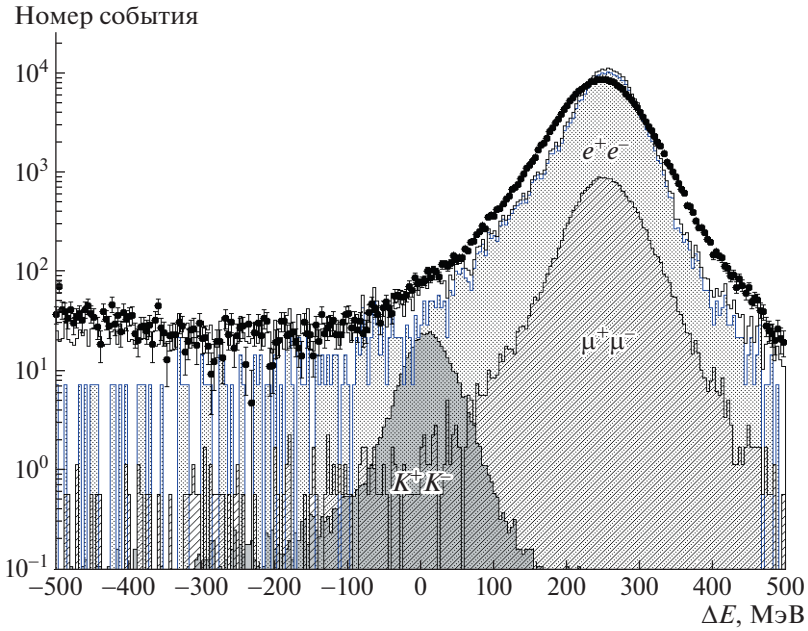

Рис. 3. Распределение параметра ΔE до подавления фона в точке $E_{\text{beam}} = 936$ МэВ. Маркеры с ошибками — эксперимент, открытая гистограмма — полное моделирование сигнального и фоновых процессов. Также показаны смоделированные вклады процессов $e^+e^- \to e^+e^-(\gamma), \mu^+\mu^-(\gamma), K^+K^-(\gamma)$.

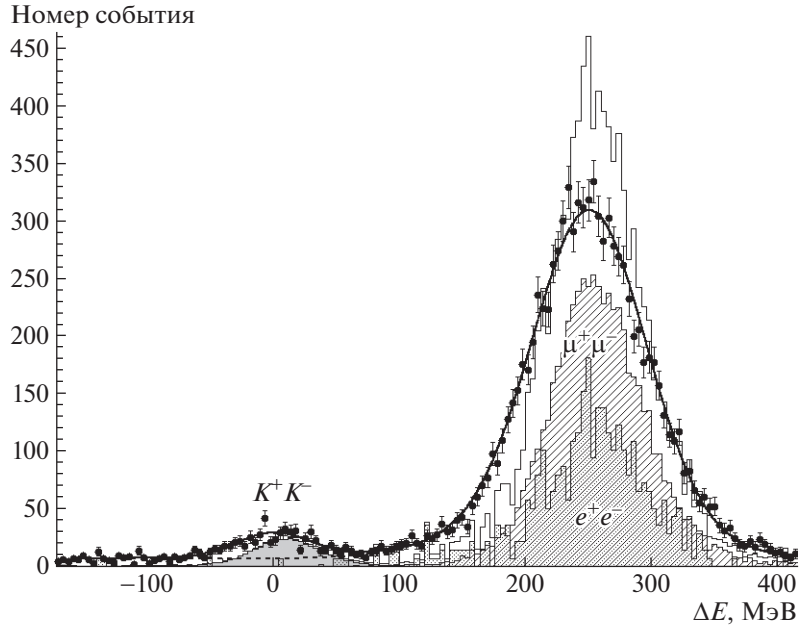

Рис. 4. Распределение параметра ΔE после подавления фона в точке $E_{\text{beam}} = 936$ МэВ. Маркеры с ошибками — эксперимент, открытая гистограмма — полное моделирование сигнального и фоновых процессов. Также показаны смоделированные вклады процессов $e^+e^- \to e^+e^-(\gamma), \mu^+\mu^-(\gamma), K^+K^-(\gamma)$. Кривые: сплошная — аппроксимация распределения в эксперименте, штриховая — часть аппроксимации, соответствующая вкладу фона.

Особое значение для обсуждаемого анализа имеет LXe-калориметр КМД-3, обладающий возможностью измерения удельных ионизационных потерь (dE/dx) в 14 слоях. Для каждого трека в ДК, достигающего LXe-калориметра, вычисляется шесть откликов классификаторов BDT (boosted decision trees), натренированных на оптимальное разделение различных пар заряженных частиц в определенном диапазоне углов и импульсов: BDT($e^\pm, \mu^\pm$), BDT($e^\pm, \pi^\pm$), BDT($e^\pm, K^\pm$),

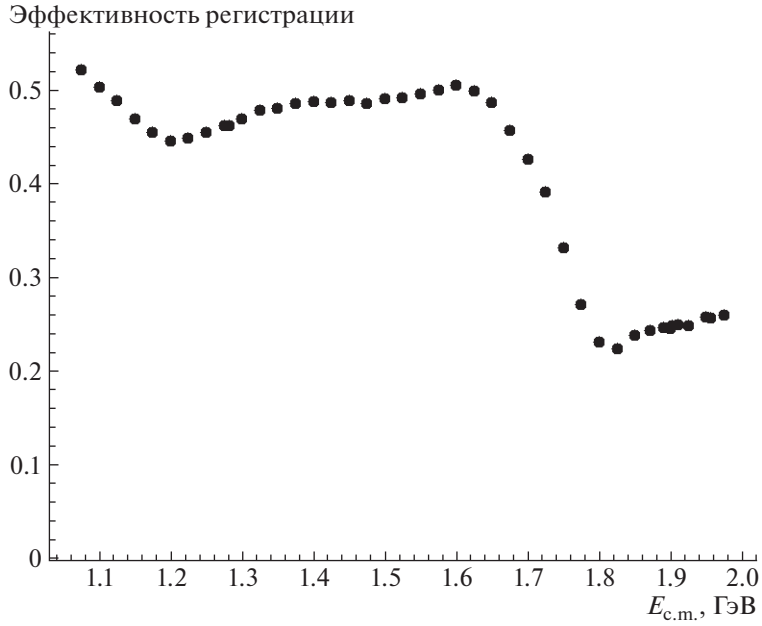

Рис. 5. Эффективность регистрации событий сигнального процесса в зависимости от энергии в системе центра масс.

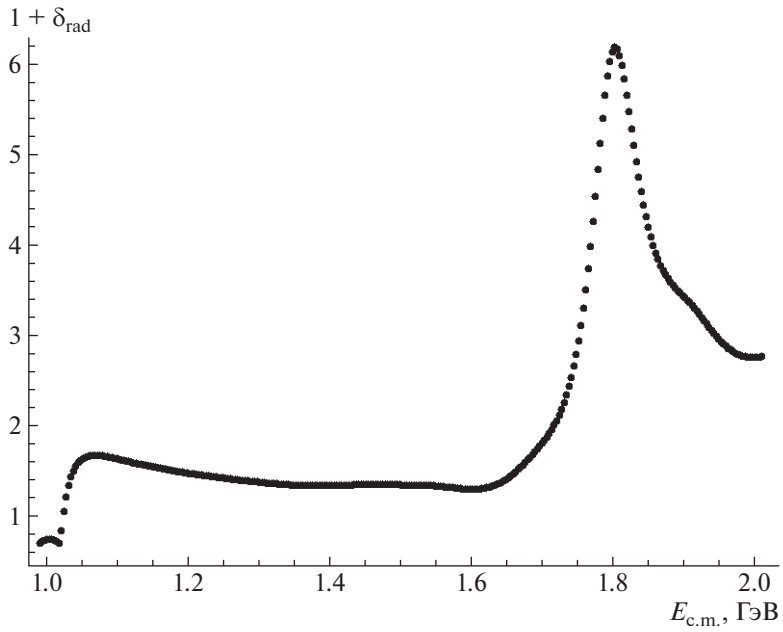

Рис. 6. Радиационная поправка в зависимости от энергии в системе центра масс.

$\mathrm{BDT}(\mu^{\pm}, \pi^{\pm})$, $\mathrm{BDT}(\mu^{\pm}, K^{\pm})$, $\mathrm{BDT}(\pi^{\pm}, K^{\pm})$. Величины этих откликов используются для отбора каонов и подавления фоновых процессов с $e^{\pm}$, $\mu^{\pm}, \pi^{\pm}$.

ОТБОР СОБЫТИЙ И ПОДАВЛЕНИЕ ФОНА

Прежде всего, мы отбираем события с ровно двумя противоположно заряженными “хорошими” треками, т.е. треками, удовлетворяющими следующим условиям:

1. условие центральности: $|\rho|$ и $|z|$ — точки на спирали трека, ближайшей к оси пучков, меньше 0.6 и 12 см соответственно;
2. полярный угол трека θ лежит в диапазоне от 1.0 до $\pi - 1.0$ рад;
3. поперечный импульс трека больше 65 МэВ/c.

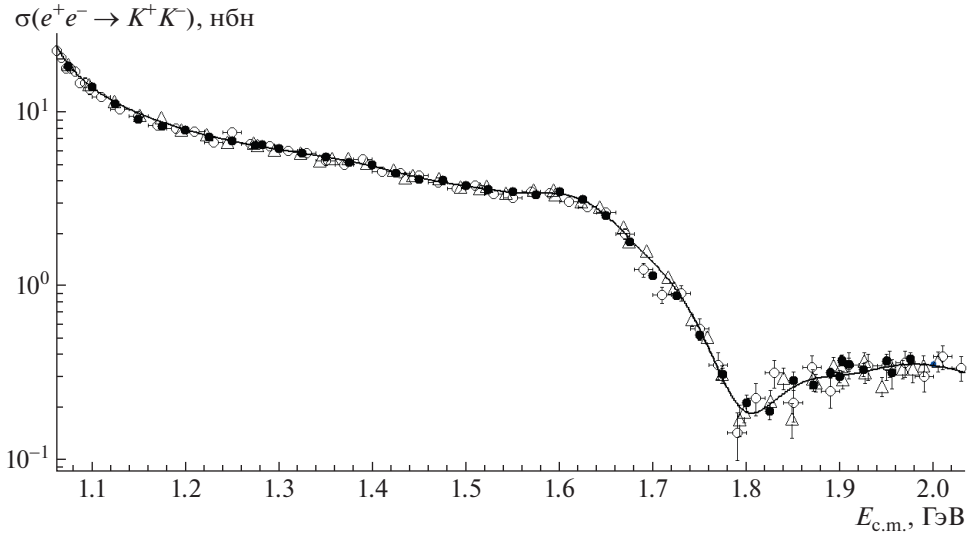

Рис. 7. Борновское сечение процесса $e^+e^- \to K^+K^-$ в зависимости от энергии в системе центра масс. Точки: ○ — результаты BaBar, △ — СНД, ● — предварительные результаты КМД-3. Кривая — аппроксимация данных КМД-3.

Далее, на два отобранных "хороших" трека накладывается условие коллинеарности по φ: $||\varphi_1 - \varphi_2| - \pi| < 0.25$ рад. Моделирование показывает, что основными фоновыми процессами являются $e^+e^- \to e^+e^-(\gamma), \mu^+\mu^-(\gamma), \pi^+\pi^-(\gamma)$, а также события с космическими мюонами. Для подавления фона от $e^+e^- \to e^+e^-(\gamma)$ мы накладываем условие отбора на средний отклик $\mathrm{BDT}(e^\pm, K^\pm)$ для двух треков (индивидуально в каждой точке по энергии), см. рис. 1. Для подавления фона от $e^+e^- \to \mu^+\mu^-(\gamma)$ и от космики условие отбора накладывается на средний отклик $\mathrm{BDT}(\mu^\pm, K^\pm)$, см. рис. 2. Поскольку сечение процесса $e^+e^- \to \pi^+\pi^-(\gamma)$ относительно мало, и события этого процесса кинематически отделены от событий $e^+e^- \to K^+K^-$, мы не накладываем условий отбора на $\mathrm{BDT}(\pi^\pm, K^\pm)$.

РАЗДЕЛЕНИЕ СИГНАЛА И ФОНА

Разделение сигнала и фона, позволяющее определить число сигнальных событий, осуществляется путем аппроксимации распределения параметра ΔE, определяемого как

$$\Delta E = \sqrt{m_K^2 + p_1^2} + \sqrt{m_K^2 + p_2^2} + \\ + |p_{1,z} + p_{2,z}| - 2E_{\mathrm{beam}},$$

где $p_{1,2}$ — импульсы частиц. Этот параметр представляет собой дисбаланс энергии в событии в предположении, что две частицы являются каонами. Добавочное слагаемое $|p_{1,z} + p_{2,z}|$ "отыгрывает" потерю энергии в результате излучения струй начальными электроном и позитроном вдоль оси пучков. На рис. 3 показано распределение ΔE в эксперименте и моделировании сигнального и фоновых процессов до подавления фона с помощью BDT, а на рис. 4 — после подавления. Видно, что применение идентификации с использованием dE/dx в LXe делает возможным разделение сигнала и фона.

Аппроксимация формы сигнального пика осуществляется суммой трех гауссов, параметры которых, за исключением положения пика и его добавочного уширения в эксперименте, фиксируются из моделирования. Аппроксимация формы фона при низких энергиях $E_{\mathrm{beam}} < 1.4$ ГэВ осуществляется линейной функцией, а при высоких энергиях $E_{\mathrm{beam}} > 1.4$ ГэВ — суммой линейной функции и трех гауссов, описывающих пикованный вклад процессов $e^+e^- \to e^+e^-(\gamma), \mu^+\mu^-(\gamma), \pi^+\pi^-(\gamma)$.

ВЫЧИСЛЕНИЕ И АППРОКСИМАЦИЯ СЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА

Видимое сечение процесса вычисляется по формуле

$$\sigma_{\mathrm{vis}} = \frac{N_{\mathrm{sig.evt.}}}{L\varepsilon},$$

где $N_{\mathrm{sig.evt.}}$ — число отобранных сигнальных событий в данной точке по энергии, L — интегральная светимость в точке, ε — эффективность регистрации событий сигнального процесса в данной точке, см. рис. 5. Борновское сечение вычисляется из видимого по формуле

$$\sigma_{\mathrm{Born}} = \frac{\sigma_{\mathrm{vis}}}{1 + \delta_{\mathrm{rad}}},$$

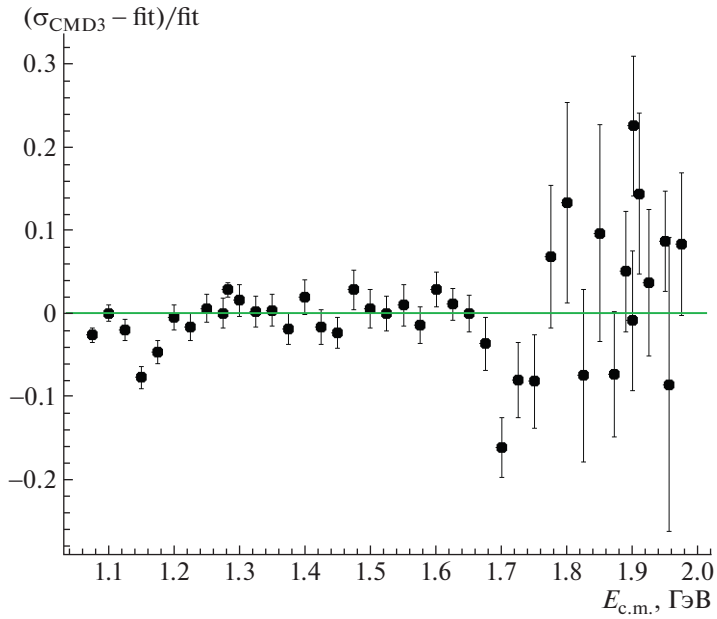

Рис. 8. Относительная разность сечения $e^+e^- \to K^+K^-$, измеренного с КМД-3, и аппроксимации результатов BaBar и СНД.

где радиационная поправка $(1 + \delta_{\text{rad}})$ вычисляется с помощью структурных функций [13], см. рис. 6.

Вычисление радиационной поправки проводится итерационно, при этом на этапе первой итерации используется аппроксимация борновского сечения, измеренного BaBar [8] и СНД [9]. Для аппроксимации сечения мы используем ту же параметризацию, что и СНД [9]. В результате получаем предварительное борновское сечение, разумно согласующееся (за исключением нескольких точек) с результатами BaBar и СНД, см. рис. 7. На рис. 8 показано также относительное отклонение измеренного нами борновского сечения от аппроксимации сечения BaBar и СНД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЛАНЫ

В данной работе были получены предварительные результаты измерения сечения процесса $e^+e^- \to K^+K^-$ с детектором КМД-3. Новизна анализа состоит в применении разработанной нами методики идентификации заряженных частиц на основе удельных ионизационных потерь в слоях LXe-калориметра. Сечение данного процесса при энергиях $E_{\text{c.m.}} > 1.6$ ГэВ не может быть измерено с КМД-3 без применения данной методики. Предварительные результаты находятся в разумном согласии с предшествующими измерениями (за исключением, быть может, нескольких точек по энергии) и имеют сравнимую статистическую точность. В дальнейшем планируется распространить данный анализ на другие экспериментальные сезоны и провести анализ систематических ошибок.

Данная работа проведена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований 20-52-00008 Бел_а. Благодарим команду ВЭПП-2000 за отличную работу ускорителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Jegerlehner, Springer Tracks Mod. Phys. **274**, 1 (2017).
2. M. Davier, A. Hoecker, B. Malaescu, and Z. Zhang, Eur. Phys. J. C **77**, 827 (2017).
3. A. Keshavarzi, D. Nomura, and T. Teubner, Phys. Rev. D **97**, 114025 (2018).
4. K. Hagiwara, R. Liao, A. D. Martin, D. Nomura, and T. Teubner, J. Phys. G **38**, 085003 (2011).
5. G. W. Bennett *et al.* (Muon g-2 Collab.), Phys. Rev. D **73**, 072003 (2006).
6. B. Khazin *et al.* (CMD-3 Collab.), Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **181–182**, 376 (2008).
7. I. A. Koop, Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **181–182**, 371 (2008).
8. J. P. Lees *et al.* (BABAR Collab.), Phys. Rev. D **88**, 032013 (2013).
9. M. N. Achasov *et al.*, Phys. Rev. D **94**, 112006 (2016).
10. V. L. Ivanov, G. V. Fedotovich, A. V. Anisenkov, A. A. Grebenuk, A. A. Kozyrev, A. A. Ruban, and K. Yu. Mikhailov, Nucl. Instrum. Methods A **952**, 161971 (2020).
11. E. V. Abakumova, M. N. Achasov, D. E. Berkaev, V. V. Kaminsky, I. A. Koop, A. A. Korol, S. V. Koshuba, A. A. Krasnov, N. Yu. Muchnoi, E. A. Pe-

revedentsev, E. E. Pyata, P. Yu. Shatunov, Yu. M. Shatunov, and D. B. Shwartz, Nucl. Instrum. Methods A **744**, 35 (2014).

12. A. E. Ryzhenenkov, R. R. Akhmetshin, A. N. Amirkhanov, A. V. Anisenkov, V. M. Aulchenko, V. Sh. Banzarov, N. S. Bashtovoy, D. E. Berkaev, A. E. Bondar, A. V. Bragin, S. I. Eidelman, D. A. Epifanov, L. B. Epshteyn, A. L. Erofeev, G. V. Fedotovich, S. E. Gayazov, *et al.*, JINST **12**, C07040 (2017).
13. E. A. Kuraev and V. S. Fadin, Sov. J. Nucl. Phys. **41**, 466 (1985).

MEASUREMENT OF THE $e^+e^- \to K^+K^-$ PROCESS CROSS SECTION WITH THE CMD-3 DETECTOR

V. L. Ivanov[1),2)]
on behalf of the CMD-3 collaboration

[1)] *Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia*
[2)] *Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russia*
[3)] *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630092, Russia*
[4)] *University of Victoria, Victoria, BC, Canada V8W 3P6*
[5)] *Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, 119333, Russia*

In this paper we present the preliminary results for the $e^+e^- \to K^+K^-$ process cross section measurement in the center-of-mass energy range from 1.075 to 1.975 GeV. The analysis is based on 62.9 pb^{-1} of integral luminosity, collected with the CMD-3 detector in the experimental runs of 2019 year. The suppression of the background processes $e^+e^- \to e^+e^-(\gamma), \mu^+\mu^-(\gamma), \pi^+\pi^-(\gamma)$ and of the events with the cosmic muons is performed with the use of specific energy losses of charged particles in the layers of the liquid xenon calorimeter of CMD-3. The preliminary results for the $e^+e^- \to K^+K^-$ cross-section measurement are in reasonable agreement with the previous measurements and have comparable statistical precision.

CMD-3 collaboration: R. R. Akhmetshin[1),2)], A. N. Amirkhanov[1),2)], A. V. Anisenkov[1),2)], V. M. Aulchenko[1),2)], V. Sh. Banzarov[1)], N. S. Bashtovoy[1)], D. E. Berkaev[1),2)], A. E. Bondar[1),2)], A. V. Bragin[1)], S. I. Eidelman[2),1),5)], D. A. Epifanov[1)], L. B. Epstein[1),3)], A. L. Erofeev[1),2)], G. V. Fedotovich[1),2)], S. E. Gayazov[1),2)], A. A. Grebenuk[1),2)], S. S. Gribanov[1),2)], D. N. Grigoriev[1),2),4)], F. V. Ignatov[1)], S. V. Karpov[1)], V. F. Kazanin[1),2)], I. A. Koop[1),2)], A. A. Korobov[1),2)], A. N. Kozyrev[1)], E. A. Kozyrev[1),2)], P. P. Krokovny[1),2)], A. S. Kuzmin[1),2)], I. B. Logashenko[1),2)], P. A. Lukin[1),2)], K. Yu. Mikhailov[1),2)], V. S. Okhapkin[1)], Yu. N. Pestov[1)], A. S. Popov[1),2)], G. P. Razuvaev[2)], A. A. Ruban[1)], N. M. Ryskulov[1)], A. E. Ryzhenenkov[1),2)], A. V. Semenov[1),2)], V. E. Shebalin[1),2)], B. A. Shwartz[1),2)], D. B. Shwartz[1),2)], A. L. Sibidanov[4)], E. P. Solodov[1),2)], A. A. Talyshev[1),2)], V. M. Titov[1)], S. S. Tolmachev[1),2)], Yu. M. Shatunov[1)], A. A. Uskov[1),2)], A. I. Vorobiev[1)], Yu. V. Yudin[1)]